

大型薄壁复杂铝合金舱体件低压铸造模拟对比分析

宋春丽^{1,2} 裴小龙^{1,2} 陈利文^{1,2} 陈磊³ 赵宇宏^{1,2,4}

(1.中北大学材料科学与工程学院; 2.山西省有色金属液态成型工程技术研究中心;
3.山西汾西重工有限责任公司; 4.北京科技大学北京市材料基因工程高精尖创新中心)

摘要 对 NovaCAST、JSCAST 和 EasyCast 3 种铸造模拟软件进行详细地介绍对比。利用 3 种软件对同一个大型薄壁复杂铝合金舱体件低压铸造过程进行模拟计算,对凝固过程和缺陷预测的模拟结果进行了对比分析。结果表明,3 种软件的计算模型、边界条件及工艺参数设置以及缺陷预测判据等方面存在差异,但舱体铸件的凝固顺序和缺陷预测位置基本一致,说明 3 种铸造模拟软件均可很好预测大型薄壁复杂舱体件铸造过程的缺陷分布。

关键词 铸造模拟; NovaCAST; JSCAST; EasyCast; 铝合金舱体

中图分类号 TG249.2; TP311 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.06.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Comparison Analysis of Low Pressure Casting Simulation of Large Thin-wall Complex Aluminum Alloy Cabin

Song Chunli^{1,2}, Pei Xiaolong^{1,2}, Chen Liwen^{1,2}, Chen Lei³, Zhao Yuhong^{1,2,4}

(1.School of Material Science and Engineering, North University of China; 2.Shanxi Engineering Research Center of Liquid Nonferrous Metals Forming; 3.Shanxi Fenxi Heavy Industry Co., Ltd.; 4.Beijing Advanced Innovation Center for Materials Genome Engineering, University of Science and Technology Beijing)

Abstract: The details of the casting simulation software from NovaCAST, JSCAST, and EasyCast were outlined. Low pressure casting process of a large thin-walled complex aluminum alloy cabin was simulated using three different software programs. The simulated results for the solidification process and defect prediction were comparatively analyzed. The results reveal that there are differences in the calculation model, boundary conditions, process parameter settings and defect prediction criteria of the three casting simulation software, however the solidification sequence of the cabin casting process and the prediction position of shrinkage defects are basically the same, indicating that the three casting simulation softwares can well predict the defect distribution in the casting process of large thin-walled complex cabin castings.

Key Words: Casting Simulation, NovaCAST, JSCAST, EasyCAST, Aluminum Alloy Cabin

铸造过程中金属液充型和凝固伴随着复杂的物理与化学变化,且由于材料选取不当、铸件形状复杂、工艺设计不佳等因素,铸件容易产生缩孔、缩松、气孔及浇不足等严重影响铸件品质的缺陷^[1-3]。由于金属液充型与凝固过程无法直接观察,经验试错法在生产过程中被广泛应用,但试错法生产成本低,产品开发周期长,不能满足当前生产的需求^[4]。利用计算机数值模拟技术可以对铸造生产过程可能产生的缺陷进行有效地预测,进而优化铸造工艺,为铸件实际生产提供参考,有效提高产

品研发效率,降低铸件生产成本^[5-6]。

随着计算机数值模拟技术的发展,各种铸造模拟仿真软件逐步发展并趋向成熟,如 MAGMA、ProCAST、Anycasting、NovaCAST、JSCAST 等,国内有 FT-Star、华铸 CAE、EasyCast 等,这些软件在铸造模拟仿真中因其算法、功能的不同而各具优势^[7-9]。傅骏等^[10]利用华铸 CAE 和浩宇 HyCAST 两款软件对车辆安装座的熔模铸造生产过程进行模拟,结果证明两种软件都可满足铸造生产需求。李峰等^[11]采用 ProCAST 软件和华铸

收稿日期:2022-11-20;修改稿收到日期:2022-12-23
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52074246,22008224,51774254,51774253);国防基础科研重点资助项目(JCKY2020408B002);山西省科技重大专项资助项目(20191102008,20191102007);山西省平台基地和人才专项资助项目(201805D211036)
第一作者简介:宋春丽,女,1994 年出生,硕士研究生,太原(030051),E-mail:1293450562@qq.com
通信作者:赵宇宏,女,1974 年出生,教授,太原(030051),E-mail:zhaoyuhong@nuc.edu.cn
引用格式:宋春丽,裴小龙,陈利文,等. 大型薄壁复杂铝合金舱体件低压铸造模拟对比分析[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(6):794-799.
SONG C L, PEI X L, CHEN L W, et al. Comparison analysis of low pressure casting simulation of large thin-wall complex aluminum alloy cabin[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(6):794-799.

CAE 两种软件对钛合金铸件生产过程进行模拟,总结出两种软件的区别:华铸 CAE 网格剖分简单、计算时间快,但是模型边界拟合较差,ProCAST 软件网格划分复杂、计算时间较长,但是网格可以较好地反映模型形状,模型边界拟合较高,同时两种数值模拟软件能够很好地预测钛合金铸件的缺陷分布。李静怡等^[12]采用 EasyCast 和 NovaCAST 软件对镁合金隔板铸件低压铸造过程进行数值模拟,发现两款软件模拟得到的温度场结果和缺陷预测结果基本一致。为了探究不同铸造模拟软件在大型薄壁复杂铝合金舱体铸件低压铸造过程的应用效果,本研究对 NovaCAST、JSCAST 和 EasyCast 3 种常用的铸造模拟软件进行介绍和对比,并对同一个大型薄壁复杂铝合金舱体件低压铸造过程进行数值模拟,通过对比分析舱体件低压铸造过程的凝固进程和缩孔缺陷分布,比较 3 种铸造模拟软件在模拟大型薄壁复杂铝合金舱体铸件的差异和准确性,为软件的选用提供参考。

1 铸造软件对比

NovaCAST 软件基于有限体积法解析铸造过程的传热、流动和应力方面的问题,可以模拟砂型铸造、金属型铸造、壳型铸造、低压铸造、压力铸造、熔模铸造等工艺,能够对缩孔、缩松和应力变形等缺陷进行仿真,进而优化铸造工艺,减少缺陷^[12]。JSCAST 软件^[13]以操作简单、功能齐全、模拟精度高、计算速度快等为主要特点,采用有限差分法对压铸、低压铸造、砂型铸造、金属型铸造、倾斜铸造、真空铸造等铸造充型、凝固过程及铸

造变形进行数值解析。EasyCast 是一套集三维实体造型文件接口、计算网格剖分、铸造过程仿真、铸造缺陷预测及结果显示为一体的集成软件系统,主要包括建模、充型分析、凝固分析^[14]和 CAD 等功能,算法采用有限差分法,综合了热量和体积的计算,提高了铸件缩孔、缩松预测的准确性。

3 款铸造模拟软件均自带材料数据库,并可根据用户需求进行自定义添加材料。NovaCAST 和 EasyCast 数据库的材料热物性和力学性能参数随温度而变化,JSCAST 数据库中有部分材料的性能随温度变化,部分材料的性能是常数。NovaCAST 和 JSCAST 软件具有与 Jmatpro 软件的直接接口,可实现 Jmatpro 软件计算材料性能参数后导入软件。

NovaCast 软件采用有限体积网格处理计算方法,可快速划分网格并准确离散模型边界,能够采用粗网格处理复杂及薄壁铸件,并能保证很高的计算精度。JSCAST 和 EasyCast 软件基于有限差分法,网格分割简单、快速,网格出错少。有限差分法由于划分的六面体网格有阶梯形状,只能简化地描述曲面;求解计算简单,易于实现,网格分割细时可提高计算精度。JSCAST 网格剖分可采用非等间距垂直剖分和混合网格,可提高内浇道、溢流槽与铸件连接处等重要部位的网格剖分精度,从而提高流动模拟精度。本研究计算模拟时铸件的网格划分均采用软件自带的网格划分模块完成,网格尺寸与网格数量足以反映铸件的实际情况,且满足模拟计算精度要求。表 1 为 3 种铸造模拟软件的概况对比^[7-8]。

表 1 3 种铸造模拟软件对比

Tab.1 Comparison of three casting simulation softwares			
软件名称	算法	分析内容	应用范围
NovaCAST	FVM	浇冒补缩结构设计计算、充型分析、凝固分析、应力分析	砂型铸造、壳型铸造、压力铸造、熔模铸造、金属型铸造等
JSCAST	FDM	充型、凝固解析,考虑过滤网的充型流动,多段分时浇注,缩孔缺陷定量预测,考虑背压的流动解析,热应力及变形解析,氧化膜卷入模拟,憋气位置预测	压铸、低压铸造,砂型铸造,金属型铸造,精密铸造,壳型铸造,重力铸造、倾斜铸造,减压铸造,差压铸造,半固态铸造,真空铸造
EasyCast	FDM	充型计算,凝固计算,缺陷预测	重力铸造、低压铸造、压力铸造

2 铸造工艺方案

2.1 铸件特点及工艺性分析

图 1 为某舱体铸件三维实体造型示意图,该铸件高约 1 100 mm,铸件内腔结构复杂,内部有较多的凸台和加强筋,壁厚不均匀,属于薄壁铸件,铸件尺寸精度要求较高。如采用砂型重力铸造方法成形,铸型刚度低,铸件尺寸精度不高,难以生产出符合品质需求的铸件,且造型困难^[15]。为获得组织致密、力学性能优良的铸件,

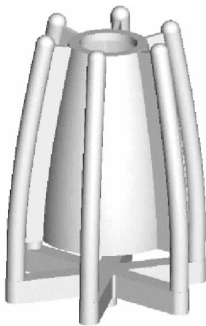


图 1 铸件三维实体造型

Fig.1 Three dimensional solid modeling of castings

采用砂型低压铸造。

2.2 材料及工艺参数设置

舱体件材质为 ZL101 合金,在 NovaCast 数据库
选用 A356 合金,JSCAST 软件中选择 AC4C 合金,
EasyCast 在材料选择时选取 ZL101 合金,浇注温度
为 720 ℃。铸型材料为砂型,初始温度为 45 ℃。

在边界条件设置时,NovaCast 软件中不设置传热系
数,而是利用气隙尺寸等效计算铸件-铸型传热边界,根据
气隙尺寸大小计算铸件与铸型边界的排热量,此处将材料
的气隙尺寸选为 2 μm^[12]。JSCAST 在传热边界条件界面
设置铸型与铸件间的传热系数为 837.22 W/(m·K)。
EasyCast 软件在边界条件确定界面中根据实际传热边
界,选择铸件与铸型间传热系数为 C600。

低压铸造需要设置的主要参数包括升液压力、升液
时间、充型压力、充型时间、结壳增压压力、结壳增压时
间、结晶增压、结晶时间、浇注温度等。根据实际情况设
置该铸件的工艺参数,表 2 为模拟计算过程中低压铸造
工艺参数。

表 2 舱体件低压铸造工艺参数

Tab.2 Low-pressure casting process parameters of cabin castings							
升液压 力/kPa	升液时 间/s	充型压 力/kPa	充型时 间/s	结壳增 压/kPa	结壳增 压时间/s	结晶增 压/kPa	结晶时 间/s
15	10	53	20	5	5	50	380

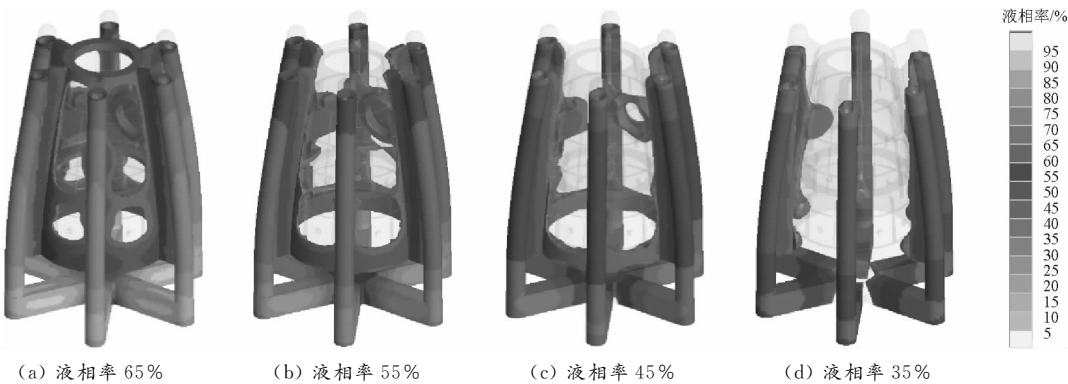


图 2 NovaCAST 凝固过程模拟结果

Fig.2 Simulation results of solidification process of NovaCAST

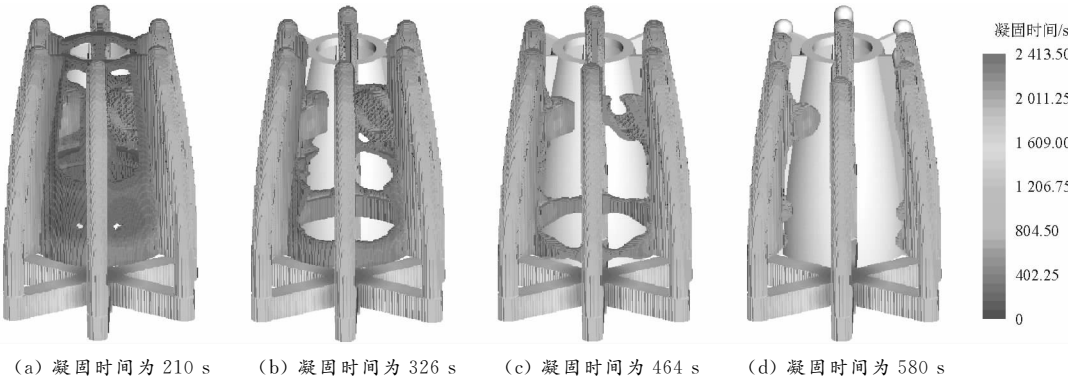


图 3 JSCAST 凝固过程模拟结果

Fig.3 Simulation results of solidification process of JSCAST

3 计算模拟结果

3.1 凝固过程模拟结果

NovaCast 软件的凝固计算模型是基于准平衡两相
区理论。JSCAST 软件对温度场及流场的数值计算,均
采用有限差分法,在流场与温度场耦合时采用热焓法,
凝固过程中潜热的处理方法采用改良温度回升法^[16-17]。
EasyCast 软件采用 SOLA-VOF 法求解流场与温度场
耦合的数学模型及计算方法,在凝固过程数值模拟中以
改进的等效比热法进行潜热处理,采用高阶紧致的三维
导热偏微分方程计算模型,提高了计算速度和计算精
度^[18-19]。

图 2~图 4 分别为 NovaCAST、JSCAST、EasyCast
软件模拟舱体铸件凝固过程的结果。通过观察铸件各
部分的凝固顺序,能够进一步分析预测铸件的充型品质
可以看出,铸件在竖直的立筒式浇道之间的铸件薄壁处
最先开始凝固,立缝和立筒的金属液在凝固结束之前始
终保持着液态,从而保证了补缩通道的畅通,并且在整
个凝固过程中铸件内部没有出现孤立熔池,尽可能减少
了缩孔缺陷。通过舱体铸件的凝固过程结果对比可知,
3 种软件凝固过程模拟结果基本一致,铸件以及浇注系
统的凝固顺序基本相同。

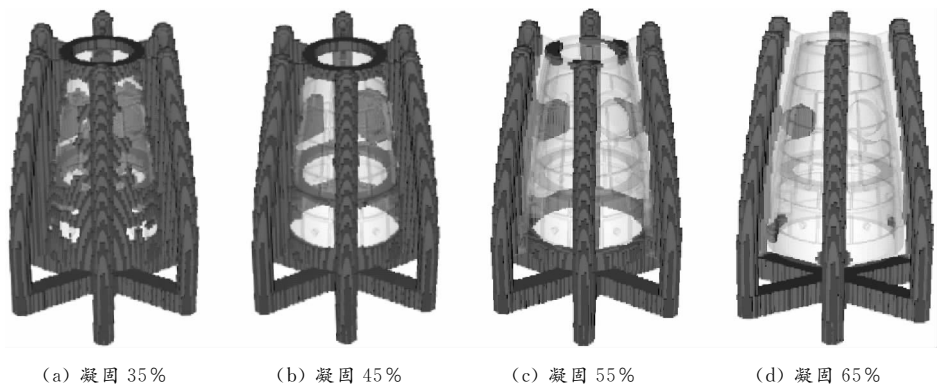


图 4 EasyCast 凝固过程模拟结果
Fig.4 Simulation results of EasyCAST solidification process

3.2 缩孔缺陷预测结果

NovaCAST 软件中缩孔形成模型基于渗流理论，两相区的枝晶对收缩过程中产生的流体流动产生阻力，液体渗流速度与压力梯度和枝晶间渗透性成正比；另外 Niyama 判据准则用于预测缩松缺陷。JSCAST 软件缩孔缩松缺陷预测解析使用了充型流动和凝固两种求解器，首先利用流动求解器计算充型过程氧化膜和卷气，再使用凝固求解器结合充型流动结果，预测因氧化膜及气泡而产生的缩孔缺陷，与氧化膜及气泡无关时可单独

使用凝固求解器进行预测；JSCAST 软件在查看缩孔、缩松缺陷时，可选择凝固时间、温度梯度、固相率梯度、冷却速度、 $G/\sqrt{R}$ 、 $K/\sqrt{R}$ 等判据，EasyCast 软件采用动态封闭多熔池等效液面收缩量法对重力铸造条件下的缩孔定量预测，而在压力条件下缩孔、缩松的判据采用修正的 Niyama 判据^[1]。

图 5 为 3 种软件的缺陷预测结果。可以看出，缩孔缺陷主要分布于浇注系统中，3 款软件预测缩孔产生的位置大致相同，缺陷分布情况相似。在凝固过程中，铸



图 5 铸件缩孔缺陷预测
Fig.5 Casting shrinkage defect location prediction

件内部最后凝固部位出现孤立的液相区，在凝固结束后极有可能形成缩孔缺陷。由图 5a 可知，NovaCAST 软件模拟发现比较严重的缺陷主要出现在浇注系统中，但铸件内部的凸台也存在部分缩孔。由图 5b 可知，JSCAST 软件发现浇注系统中的缺陷由最后凝固的孤立液相区形成，在铸件内部也分布着细小的缩孔。由图 5c 可知，EasyCast 软件预测较大的缺陷主要分布在浇注系统中，但铸件的顶部以及铸件内的凸台处也有较小的缩孔缺陷。缩孔、缩松缺陷严重地影响了铸件的品质和使用性能，因此需要进行工艺方案优化。

3.3 优化工艺及结果分析

为了减少缩孔产生，保证较高的铸件品质，满足产品的使用性能，考虑设计合适工艺改进方案。通过初始方案模拟结果的分析可知，缩孔主要产生于铸件内部的

凸台处以及顶端的厚壁处。为了优化铸件凝固顺序，改善补缩通道，优先考虑添加冷铁，增加横向补缩能力^[20-21]。根据铸件结构特征、铸件凝固顺序以及缺陷预测结果，进行冷铁设计，见图 6。

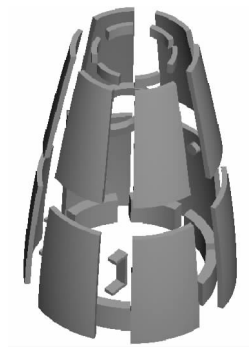


图 6 冷铁设计
Fig.6 Cold iron design

对改进后的方案进行模拟,得到 NovaCAST、JSCAST、EasyCast 3 种软件模拟预测的缩孔缺陷位置,见图 7。可以看到添加冷铁后,缩孔全部位于浇注系统中,铸件内部不存在缩孔缺陷,说明添加冷铁使得这些部位优先冷却凝固,提高过冷度,增加形核,细化晶粒尺

寸^[22-23],原方案中铸件内部的缺陷得以改善,获得品质良好的铸件,满足产品实际生产需求^[24]。

将优化改进后的方案应用于企业的实际生产中,得到了品质优良的铸件,满足实际使用性能要求,工艺优化达到了预期目标。



图 7 改进方案后铸件缩孔缺陷预测

Fig.7 Prediction of casting shrinkage defects in the optimized scheme

4 讨论与分析

(1)在网格划分方面 NovaCAST 软件采用有限体积法,划分网格后的模型表面光滑,更贴近实际铸件形状,适合高精度模拟仿真。JSCAST 软件采用有限差分法,可按等间隔、等剖分、剖分数等规则进行网格剖分,在划分网格时可将铸型和铸件设为不同大小的网格尺寸,既能保证铸件精度,又可避免铸型网格数量过小而造成的计算效率降低。另外,可在内浇口或铸件薄壁处根据需求进行自定义增加或移动网格线,以确保网格精度;同时 JSCAST 软件增加了制作混合网格功能,弥补了六面体网格阶梯型边界的不足。EasyCast 软件采用有限差分法,铸件和铸型采用统一尺寸的网格。

(2)在传热边界条件设置方面 NovaCAST 软件通过设置气隙尺寸大小等效计算铸件与铸型之间的传热;JSCAST 软件与 EasyCast 软件均是设置传热系数。

(3)在模拟参数设置方面 NovaCAST 软件需要设置加压时间、加压压力以及保压压力,还可根据实际生产设置坩埚等设备的尺寸;JSCAST 软件通过设置速度边界条件,即设置充型时间和充型速度,在凝固计算时无法设置保压压力;EasyCast 软件需要设置加压时间、初始压力、保压压力和保压时间。

(4)在使用功能上 3 种软件均可适用于多种铸造方法,NovaCAST 软件在模拟低压铸造时更有优势,其模拟参数设置上与实际低压铸造试验更接近。

(5)在模拟结果显示上 3 种软件存在一些差异,因其计算方法、模型和缩孔缩松缺陷判据有不同之处,但是凝固进程与缺陷分布位置基本一致,并且通过预测

缺陷的结果进而优化工艺方案的趋势一致,添加冷铁后,有效改善铸件凝固顺序,消除了铸件内部的缩孔、缩松缺陷^[25],保证铸件品质。

5 结 论

(1)在铸件凝固过程方面,3 种软件的模拟结果基本一致。在凝固过程中都是立筒式直浇道之间的铸件薄壁处先开始凝固,带有凸台的厚壁处散热较差,凝固进程比较缓慢,浇注系统最后凝固。

(2)在缺陷预测方面,3 款软件预测缩孔缺陷形貌,因其计算模型、边界条件及工艺参数设置和缺陷预测判据不同而有所差异,但缺陷产生的位置大致相同,缺陷分布情况相似。在初始工艺方案中,较大的缩孔缺陷分布在浇注系统中,在铸件内部的凸台处有较小的缩孔。经过改进工艺方案,模拟预测的缩孔缺陷均分布在浇注系统中,铸件内部无缺陷,铸件品质良好。

(3)通过 NovaCAST、JSCAST 和 EasyCast 软件在同一舱体件上应用比较,NovaCAST 软件划分网格后的模型更符合实际,JSCAST 和 EasyCast 采用有限差分法,网格剖分简单,但模型边界拟合需要进一步完善。

参 考 文 献

- [1] 侯华.铸造充型凝固过程宏微观数值模拟及工程应用[D].太原:中北大学,2005.
- [2] ZHAO Y H, ZHANG B, HOU H, et al. Phase-field simulation for the evolution of solid/liquid interface front in directional solidification process[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(6): 1 044-1 052.
- [3] 周建新.铸造计算机模拟仿真技术现状及发展趋势[J].铸造, 2012, 61(10): 1 105-1 115.

- [4] 刘东戎,杨智鹏,王丽萍,等.铸造充型过程数值模拟技术的发展及现状评述[J].哈尔滨理工大学学报, 2016, 21(3): 96-100, 105.
- [5] 赵宇宏,程军,徐宏,等.铸钢件凝固过程热应力场数值模拟研究[J].中北大学学报(自然科学版), 1998, 19(4): 306-308.
- [6] 杨智强,起华荣,郭红星,等.国内铸造工艺数值模拟研究及应用现状[J].铸造技术, 2017, 38(9): 2 072-2 075.
- [7] 周丹晨,蒋玉明,杨屹.国外铸件充型凝固过程数值模拟软件介绍[J].热加工工艺, 2000(5): 45-46.
- [8] 米国发,刘翔宇,王狂飞.铸造充型过程数值模拟的研究进展及应用[J].河南理工大学学报(自然科学版), 2007, 26(3): 334-339.
- [9] 周建新,吴凯,殷亚军,等.华铸 CAE 消失模铸造模拟软件的开发与应用[J].铸造设备与工艺, 2016(2): 37-41.
- [10] 傅骏,肖方志,翟开华,等.两种国产铸造数值模拟软件的应用[J].铸造技术, 2017, 38(8): 2 027-2 029.
- [11] 李峰,崔新鹏,王丽娟,等.两种铸造模拟软件在钛合金铸件研制中的应用对比[J].精密成形工程, 2018, 10(3): 163-167.
- [12] 李静怡,赵宇宏,陈利文,等.镁合金隔板铸件低压铸造工艺数值模拟[J].特种铸造及有色合金, 2021, 41(5): 588-592.
- [13] 宁显润.基于 NX 及 NOVACAST 对大断面球铁件的数值模拟[J].中国铸造装备与技术, 2020, 55(3): 33-36.
- [14] 王光文.球墨铸铁—汽车转向节的铸造工艺及计算机模拟仿真分析[D].乌鲁木齐:新疆大学, 2009.
- [15] 赵宇宏,牛晓峰,侯华.基于 FDM/FEM 的镁合金挤压铸造温度场数值模拟[J].兵器材料科学与工程, 2011, 34(4): 1-4.
- [16] 代志功,毕俊喜.基于 ProCAST 的泵体底座低压铸造工艺分析[J].热加工工艺, 2018, 47(13): 84-86.
- [17] 朱金东,大中逸雄,木下文昭,等.铸造软件 JSCAST 在压铸缺陷预测及压铸模具设计中的应用[A].第八届中国国际压铸会议论文集[C].上海, 2012.
- [18] 牛晓峰,王冠乾,梁伟,等.基于近似因子分解法的铸造充型过程数值模拟研究[J].中国机械工程, 2014, 25(4): 546-549.
- [19] 牛晓峰,穆彦青,梁伟,等.基于投影法的挤压铸造充型过程数值模拟[J].特种铸造及有色合金, 2014, 34(1): 57-59.
- [20] 侯华,靳玉春,赵宇宏,等.液态成型工艺及 CAD[M].北京:国防工业出版社, 2012.
- [21] 陈国桢,肖柯则,姜不居.铸件缺陷和对策手册[M].北京:机械工业出版社, 1996.
- [22] 康永生,赵宇宏,侯华,等. Fe-C 合金枝晶生长的三维相场模拟[J].特种铸造及有色合金, 2016, 36(12): 1 262-1 265.
- [23] KANG Y S, JIN Y C, ZHAO Y H, et al. Phase-field simulation of tip splitting in dendritic growth of Fe-C alloy[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2017, 24(2): 171-176.
- [24] 潘龙,余国康,邹文兵,等.镁合金筒形件低压铸造工艺研究[J].特种铸造及有色合金, 2021, 41(4): 512-517.
- [25] 赵宇宏.材料相变过程微观组织模拟[M].北京:国防工业出版社, 2010.

(编辑:张正贺)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和最新技术信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16 开,邮发代号 38-109。邮发订价每期 20 元,全年 240 元,如须快递,费用另计。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司



地址:武汉市江岸区九万方路 26 号

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024

传真:027-85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

